

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
"ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ"

А.А. Петков

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ РЕЗИСТОРОВ  
ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ**

Учебно-методическое пособие по курсу  
"Разработка электрофизических установок для испытаний  
и исследований"  
для студентов электротехнических и электроэнергетических  
специальностей

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета,  
протокол № 1 от 02.04.2009 г.

Харьков НТУ "ХПИ" 2009

ББК 31.24

П 23

УДК 621.3

Рецензенты:

*А.В. Исакова*, к-т техн. наук, доцент, НТУ "ХПИ";

*Ю.М. Полужков*, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., ИТФ ХФТИ.

Викладено теоретичні основи та надано практичні рекомендації для проведення розрахунків і проектування захисних резисторів ємнісних накопичувачів енергії. Наведено приклади розрахунку дротяних резисторів і блоків з резисторів ТВО.

Призначено для студентів електротехнічних і електроенергетичних спеціальностей.

**Петков А.А.**

П 23

Расчет и проектирование защитных резисторов емкостных накопителей энергии : учеб.-метод. пособие / А.А. Петков. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2009. – 66 с.

ISBN

Изложены теоретические основы и даны практические рекомендации по проведению расчетов и проектированию защитных резисторов емкостных накопителей энергии. Приведены примеры расчета проволочных резисторов и блоков из резисторов ТВО.

Предназначено для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей.

Ил. 30. Табл. 10. Библиогр. 14 назв.

ISBN

ББК 31.24

© А.А. Петков, 2009

## **Введение**

Конденсаторные батареи высоковольтных емкостных накопителей энергии (ЕНЭ), которые используются в различных электрофизических и испытательных установках с большой запасаемой энергией, могут содержать сотни и даже тысячи конденсаторов. Это связано с тем, что высоковольтные конденсаторы, выпускаемые серийно промышленностью и мелкосерийно специальными подразделениями исследовательских и проектных организаций, имеют ограниченный ряд значений емкости. Чтобы накопить большую энергию, конденсаторы соединяются параллельно (реже – последовательно-параллельно). Для такого соединения при пробое одного из них происходит разряд всех других конденсаторов батареи на пробитый конденсатор, который в этом случае представляет собой в первом приближении низкоомное активное сопротивление. Этот процесс может привести к деформации, разгерметизации, взрыву и возгоранию пробитого конденсатора. Наиболее вероятным и опасным, с точки зрения последствий, является пробой конденсатора на стадии заряда ЕНЭ [1]. Чтобы исключить эти негативные последствия, применяют защиту конденсаторов, которая функционирует в случае пробоя одного из них. Цель защиты – ограничить энергию, выделяющуюся в пробитом конденсаторе. Проектирование системы защиты осуществляется обычно в два этапа.

На первом этапе все конденсаторы разбивают на модули, содержащие такое количество конденсаторов, что при пробое одного из них и разряде на пробитый конденсатор других конденсаторов модуля, не происходит разрушение пробитого конденсатора.

На втором этапе ограничивают возможность разряда исправных модулей на аварийный модуль, содержащий пробитый конденсатор. В

зависимости от запасаемой энергии, зарядного напряжения ЕНЭ, а также конструктивных особенностей его исполнения возможны различные способы ограничения разряда исправных модулей на аварийный модуль. Одним из наиболее простых способов является применение защитных разделительных резисторов.

В настоящем пособии рассмотрены две основные схемы защиты конденсаторов ЕНЭ с применением резисторов.

Материалы пособия предназначены для изучения теоретических основ, выполнения контрольных работ, курсового и дипломного проектирования.

Для удобства пользователей пособие снабжено кратким терминологическим словарем, приведенным в приложении П.1. Словарь содержит основные термины, используемые при изложении материалов пособия.

Проектирование защитных резисторов связано с проведением разнообразных расчетов, которые удобно проводить с использованием программного продукта Excel. В приложении П.2 рассмотрены основные приемы вычислений, используемых в практике расчетов защитных резисторов.

Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам научно-исследовательского и проектно-конструкторского института "Молния" НТУ "ХПИ" Е.Г. Понуждаевой и О.С. Недзельскому за помощь в подготовке материалов пособия.

# 1. Основные схемы защиты конденсаторов емкостных накопителей энергии на стадии заряда с использованием защитных резисторов

## 1.1. Схема защиты конденсаторов с резистором, включенным в цепь разряда ЕНЭ на нагрузку

Для защиты конденсаторов с помощью резисторов используются различные схемные решения. На рис. 1.1 показана схема защиты конденсаторов с резистором, включенным в цепь разряда ЕНЭ на нагрузку.

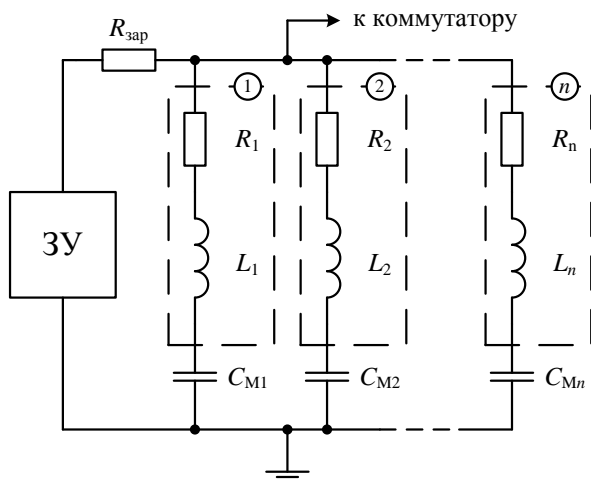


Рисунок 1.1 – Схема защиты конденсаторов с резистором, включенным в цепь разряда ЕНЭ на нагрузку

Заряд конденсаторной батареи, состоящей из  $n$  модулей с емкостями  $C_{M1}, C_{M2}, \dots, C_{Mn}$ , осуществляется от зарядного устройства ЗУ через зарядный резистор  $R_{зар}$ . Каждый модуль заряжается через защитный резистор, обозначенный на схеме рис. 1.1 пунктирной линией. На схеме каждый резистор представлен последовательно соединенными

активным сопротивлением и индуктивностью, которые отражают основные характеристики защитного резистора:  $R_1, R_2, \dots R_n$ ;  $L_1, L_2, \dots L_n$ . Как видно из схемы, при разряде ЕНЭ ток разряда каждого модуля протекает через защитный резистор. Таким образом, параметры резистора могут влиять на форму и значения импульса тока, создаваемого ЕНЭ. Для исключения такого влияния обычно величину активного сопротивления и индуктивности защитного резистора выбирают из условий, чтобы эквивалентные сопротивление и индуктивность всех резисторов были на много меньшими соответствующих параметров внешней цепи разряда ЕНЭ (относительно зажимов резисторов).

Пусть все модули батареи конденсаторов имеют одинаковую емкость  $C_{M1} = C_{M2} = \dots C_{Mn} = C$ , а все защитные резисторы – одинаковые активное сопротивление и индуктивность  $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$ ,  $L_1 = L_2 = \dots = L_n = L$ . При таких условиях ток разряда всех модулей описывается одинаковой временной функцией, которая позволяет представить конденсаторную батарею эквивалентной последовательной  $RLC$  – ветвью, параметры которой равны:  $C_3 = nC$ ,  $R_3 = R / n$ ,  $L_3 = L / n$ . Тогда для исключения влияния защитных резисторов должны выполняться следующие условия:

$$\frac{R}{n} \leq kR_{BH} ; \quad \frac{L}{n} \leq kL_{BH} , \quad (1.1)$$

где  $R_{BH}$ ,  $L_{BH}$  – соответственно активное сопротивление и индуктивность внешней цепи; коэффициент  $k$  на практике принимают не более 0,1.

Тогда наибольшие допускаемые значения параметров защитных резисторов определяются из (1) следующим образом:

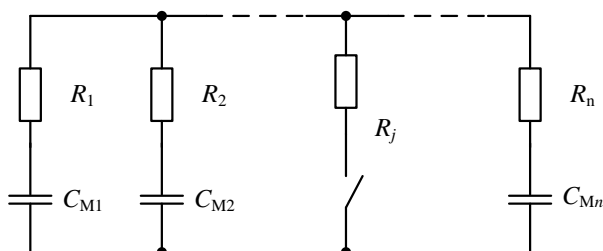
$$R = nkR_{BH} ; \quad (1.2)$$

$$L = nkL_{BH} . \quad (1.3)$$

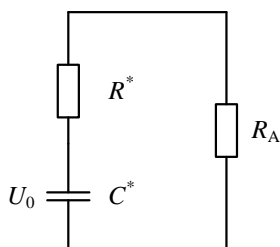
Наименьшее значение активного сопротивления защитного резистора определяется тем, что оно должно быть много больше активного сопротивления канала пробоя конденсатора, которое составляет 0,01 – 0,1 Ом. На практике наименьшее значение сопротивления защитного резистора принимают порядка 1,5 Ом.

К наименьшему значению индуктивности защитных резисторов никаких требований не предъявляется.

При пробое конденсатора в одном из модулей (аварийный модуль) на стадии заряда эквивалентная электрическая схема разряда исправных модулей принимает вид, показанный на рис. 1.2а.



*a*



*б*

Рисунок 1.2 – Эквивалентная схема разряда батареи на аварийный модуль

Схема составлена в предположении, что индуктивность защитных резисторов и сопротивление пробитого конденсатора имеют значения, которые значимо не влияют на переходный процесс, и аварийный мо-

дуль имеет номер  $j$ . Если все емкости и сопротивления в схеме имеют одинаковое значение, она преобразуется в эквивалентную схему, показанную на рис. 1.2б. На схеме обозначено:  $R_A$  – активное сопротивление аварийного модуля,  $R^*$  – эквивалентное активное сопротивление исправных модулей,  $C^*$  – эквивалентная емкость исправных модулей,  $U_0$  – зарядное напряжение конденсаторной батареи. Значения параметров схемы определяются по соотношениям

$$R_A = R, \quad R^* = R / (n-1), \quad C^* = (n-1)C. \quad (1.4)$$

Тогда энергия, адиабатически выделяющаяся (без теплоотдачи за время выделения) в резисторе аварийного модуля, определится из соотношения

$$W_A = \frac{C^* U_0^2}{2} \frac{R_A}{R_A + R^*}. \quad (1.5)$$

При большом количестве модулей энергия, которая выделяется в защитном резисторе, близка к энергии, которая запасается батареей конденсаторов.

Максимальное значение импульсного напряжения, прикладываемого к защитному резистору в аварийном режиме, определим из схемы, приведенной на рис. 1.2 б:

$$U_{RA} = U_0 \frac{R_A}{R_A + R^*}. \quad (1.6)$$

Учитывая то, что  $R_A > R^*$ , на практике принимают  $U_{RA} = U_0$ .

Наибольшее постоянное (пульсирующее) напряжение, прикладываемое к защитному резистору в режиме заряда, определим из схемы, приведенной на рис. 1.1, пренебрегая влиянием индуктивности защитных резисторов



$$U_R = U_0 \frac{R}{nR_{\text{зад}}} . \quad (1.7)$$

Следует отметить, что при больших значениях энергии, запасаемой в ЕНЭ, защитные резисторы имеют массогабаритные показатели, выходящие за экономически оправданные рамки, и необходимо применять менее затратные схемы защиты.

## 1.2. Кольцевая схема защиты

Для уменьшения массогабаритных показателей защитных резисторов может быть использована схема защиты с резисторами, включенными между модулями таким образом, что они образуют замкнутый контур (кольцевая схема защиты) [2]. Данная схема показана на рис. 1.3.

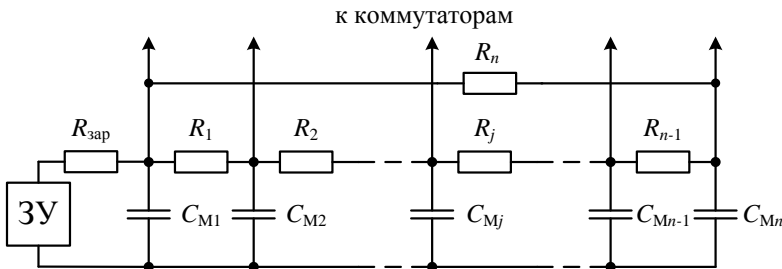


Рисунок 1.3 – Кольцевая схема защиты

В кольцевой схеме защиты заряд ЕНЭ осуществляется от зарядного устройства ЗУ через зарядный резистор  $R_{\text{зап}}$  и защитные резисторы  $R_1, R_2, \dots, R_n$ . Особенностью данной схемы является то, что защитные резисторы не включены в цепь разряда ЕНЭ и соответственно их параметры не влияют на формируемый импульс разрядного тока ЕНЭ.

В связи с этим к индуктивности защитного резистора никаких требований не предъявляется. Наименьшее значение сопротивления резистора, как и в случае схемы защиты, рассмотренной в п.1.1, не может быть меньше 1,5 Ом. Наибольшее значение сопротивления определяется из условия, что время зарядки не должно быть больше некоторой величины, определяемой техническими условиями на конденсаторы или технологическими условиями работы ЕНЭ.

Верхняя оценка постоянной зарядки ЕНЭ в схеме, приведенной на рис. 1.3, при условии, что  $R_1 = R_2 = \dots R_n = R$ , может быть вычислена по следующим формулам, полученным в предположении, что все конденсаторы батареи сосредоточены в точке кольцевой схемы, противоположной точке подключения к ней зарядного резистора  $R_{зар}$ :

– при нечетном количестве модулей  $n = 3, 5, 7, \dots$

$$\tau_{\zeta\grave{a}\delta} = n \left( R_{\zeta\grave{a}\delta} + R \frac{n-1}{4} \right) C_i , \quad (1.8)$$

– при четном количестве модулей  $n = 2, 4, 6, \dots$

$$\tau_{\zeta\grave{a}\delta} = n \left( R_{\zeta\grave{a}\delta} + R \frac{n}{4} \right) C_i . \quad (1.9)$$

Оценка времени зарядки может быть произведена по формуле

$$t_{\zeta\grave{a}\delta} = k \tau_{\zeta\grave{a}\delta} , \quad (1.10)$$

где  $k$  – коэффициент, который зависит от способа зарядки; для зарядки от источника постоянного напряжения  $k = 5$ ; для зарядки от однофазной системы выпрямления  $k = 15$ .

Максимальная энергия, которая выделяется в защитном резисторе, подсоединенном к выводу аварийного модуля, не превышает  $3W_M$ , где  $W_M$  – энергия, запасаемая в модуле [2].

Наибольшее значение импульсного напряжения, прикладываемого к защитному резистору в аварийном режиме, принимается равным зарядному напряжению батареи  $U_{RA} = U_0$ , а в режиме заряда оценивается по следующей формуле, в предположении, что модуль, подключенный к зарядному резистору, заряжается мгновенно:

$$U_R = U_0 \frac{R}{R + 2R_{\zeta\grave{a}\delta}}. \quad (1.11)$$

### 1.3. Основные требования к защитным резисторам

1.3.1. Активное сопротивление защитного резистора должно находиться в интервале, нижняя граница которого равна 1,5 Ом, а верхняя определяется в зависимости от схемы защиты по соотношению (1.2) или с использованием (1.8) – (1.10).

1.3.2. Величина индуктивности защитных резисторов для схемы с резистором, включенным в цепь разряда ЕНЭ, не должна превышать вычисленной по (1.3).

1.3.3. Изоляция защитного резистора должна выдерживать постоянное (пульсирующее) напряжение в режиме заряда, определяемое по формулам (1.7) и (1.11), а в аварийном режиме – импульсное напряжение с максимальным значением, равным зарядному напряжению ЕНЭ.

1.3.4. Защитный резистор должен быть рассчитан на адиабатическое выделение в нем энергии аварийного режима, которая для схемы защиты с резистором, включенным в цепь разряда, определяется по формуле (1.5), а для кольцевой схемы защиты составляет  $3W_M$  – три энергии, запасаемой в модуле.

## **2. Типы элементов, используемых в качестве защитных резисторов**

В качестве защитных резисторов ЕНЭ чаще всего используются два типа элементов: высоковольтные проволочные резисторы (чаще всего индивидуального изготовления) и резисторы промышленного изготовления типа ТВО [3, 4].

2.1. Проволочные резисторы, общий вид которых показан на рис. 2.1 и рис. 2.2, представляют собой изоляционный каркас (обычно кругового сечения), на который в один слой наматывается проволока с высоким омическим сопротивлением (проводящий элемент). На рис. 2.1 показан резистор промышленного изготовления С5-40В-500 Вт номинальным сопротивлением 1 кОм. На рис. 2.2 – резистор индивидуального изготовления. Характеристики проволоки, применяемой для намотки, приведены в приложении П.3. При изготовлении резисторов применяются обычная и встречная намотки, схемы которых показаны на рис. 2.3 и рис. 2.4. Встречная намотка используется для уменьшения индуктивности защитного резистора. На рис. 2.5 показаны основные элементы конструкции проволочных резисторов индивидуального изготовления. Для механического закрепления витков проволока 5 обычно укладывается в винтовой паз, нарезаемый с определенным шагом на поверхности изоляционного каркаса 1 с использованием токарного станка. Применяется также бандажирование с помощью изоляционной ленты и изоляционное покрытие поверхности резистора 6 на основе лака или эпоксидного компаунда. При встречной намотке в местах контакта проволоки двух витков прокладывают тонкую изоляцию для исключения искрения.

Для крепления резисторы снабжены фланцами 2 с резьбовыми отверстиями и резьбовыми шпильками 3. Проволока прикрепляется с помощью винтов 4 непосредственно к фланцам, которые одновременно выполняют функцию токоподводов.



Рисунок 2.1 – Общий вид высоковольтного проволочного резистора C5 – 40В



Рисунок 2.2 – Общий вид высоковольтного проволочного резистора индивидуального изготовления со встречной намоткой

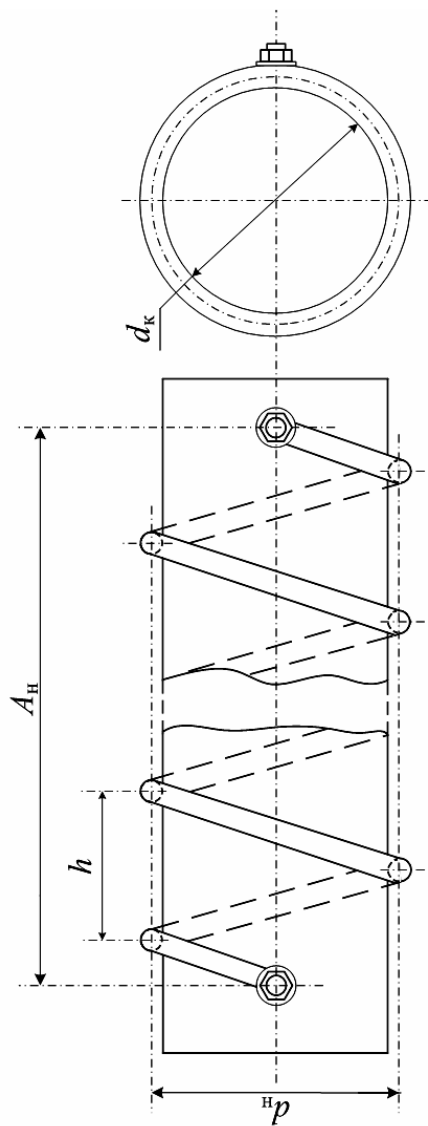


Рисунок 2.3 – Схема обычной однослойной намотки

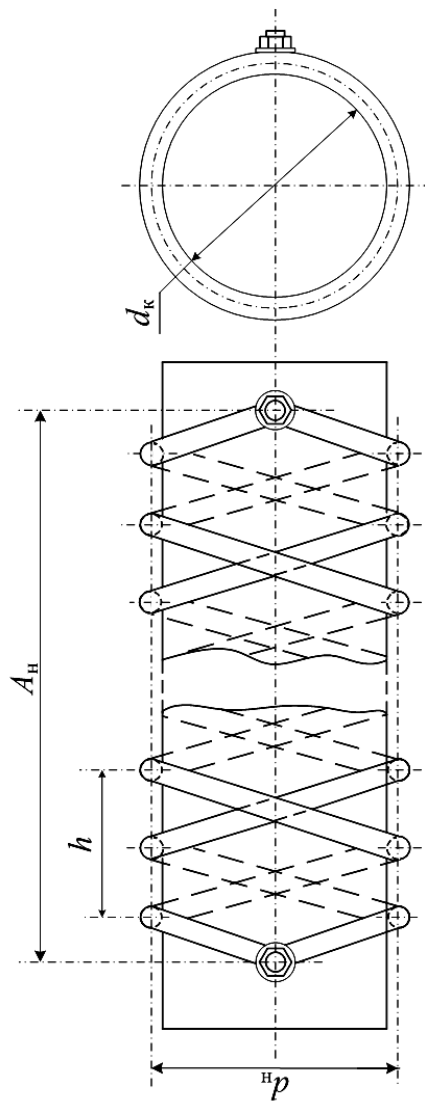


Рисунок 2.4 – Схема встречной однослойной намотки



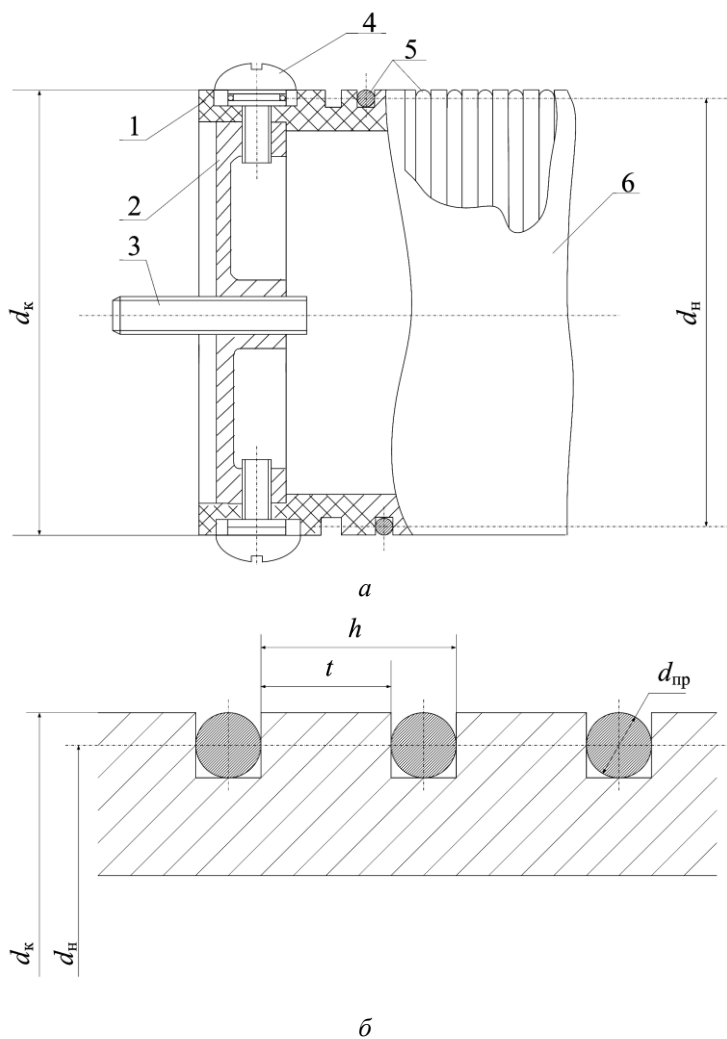


Рисунок 2.5 – Основные элементы конструкции проволочных резисторов индивидуального изготовления

Отметим особенность определения диаметра намотки:

– если проволока наматывается непосредственно на каркас диаметром  $d_k$ , как показано на рис. 2.3 и рис. 2.4, то диаметр намотки определяется как

$$d_n = d_k + d_{пр}. \quad (2.1)$$

Если намотка осуществляется в винтовой паз, как показано на рис. 2.5, то

$$d_n = d_k - d_{пр}. \quad (2.2)$$

Величина перемычки  $t$  должна быть такой, чтобы исключить скол материала при нарезке винтового паза. При использовании стеклотекстолитовых труб на эпоксидном связующем принимают  $t \geq 4$  мм.

2.2. Резисторы ТВО представляют собой объемный проводящий элемент, защищенный стеклокерамической оболочкой [3]. Общий вид резисторов показан на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Общий вид резисторов типа ТВО.  
Сверху вниз: ТВО-60, ТВО-20, ТВО-10 и ТВО-5

Внутреннее строение резисторов типа ТВО показано на рис. 2.7.

Наиболее часто используются резисторы ТВО-5, ТВО-10, ТВО-20 и ТВО-60. Цифры после обозначения типа резистора "ТВО" означают мощность рассеивания резистора. Резисторы ТВО-5, ТВО-10, ТВО-20 изготавливаются с осевыми проволочными выводами, резисторы ТВО-60 изготавливаются с пластинчатыми выводами. Основные характеристики резисторов ТВО приведены в приложении П.4. Обычно используются блоки защитных резисторов, состоящие из нескольких резисторов ТВО.



ТВО-60



ТВО-10

Рисунок 2.7 – Резисторы типа ТВО после аварийного разрушения

### 3. Расчет параметров резисторов из проволоки с высоким омическим сопротивлением

#### 3.1. Расчет активного сопротивления

Активное сопротивление проволочного резистора рассчитывается по формуле

$$R = \rho \frac{A_{\text{вд}}}{S_{\text{пр}}}, \quad (3.1)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала проводящего элемента;  $A_{\text{пр}}$  – длина проводящего элемента;  $S_{\text{пр}}$  – площадь сечения проводящего элемента.

Если проводящий элемент состоит из нескольких проволок круглого сечения, то площадь сечения проводящего элемента

$$S_{\text{вд}} = \frac{k_{\text{пр}} \pi d_{\text{пр}}^2}{4}, \quad (3.2)$$

где  $k_{\text{пр}}$  – количество проволок в проводящем элементе;  $d_{\text{пр}}$  – диаметр проволоки.

Удельное сопротивление  $\rho$  и диаметры  $d_{\text{пр}}$  проволок, чаще всего используемых при изготовлении проволочных резисторов, приведены в приложении П.3.

Длина проводящего элемента

$$A_{\text{вд}} = \omega A_{\text{в}}, \quad (3.3)$$

где  $\omega$  – количество витков катушки;  $A_{\text{в}}$  – длина витка проводящего элемента.

Для намотки на круговом цилиндрическом каркасе длина витка равна (см. рис. 2.3 и рис. 2.4):

$$A_a = \sqrt{(\pi d_1)^2 + h^2} \quad (3.4)$$

где  $d_n$  – диаметр намотки,  $h$  – шаг намотки.

Длина намотки определяется по формуле

$$A_l = \omega h. \quad (3.5)$$

Рекомендуемый ряд шагов для нарезки винтовых пазов приведен в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Ряд рекомендуемых шагов

Шаг винтовой линии, мм
4,5; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12; 14; 16; 18; 24; 28; 30; 36

## 3.2. Расчет индуктивности

3.2.1. Индуктивность обычной однослойной намотки рассчитывается как индуктивности цилиндрического соленоида [5]. Под соленоидом понимается цилиндрическая катушка, состоящая из большого количества витков проволоки, образующих винтовую линию. Витки катушки для расчета индуктивности представляют собой систему последовательно соединенных кольцевых токов. Расчетная модель обычной намотки показана на рис. 3.1а. Направление токов во всех витках одинаково.

Индуктивность резистора с обычной намоткой рассчитывается по формуле

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \omega^2 d_1 \Phi, \quad (3.6)$$

где  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Гн /м;  $\omega$  – количество витков;  $d_n$  – диаметр намотки;  $\Phi$  – коэффициент, зависящий от отношения  $\alpha = \frac{A_f}{d_f}$  [5].

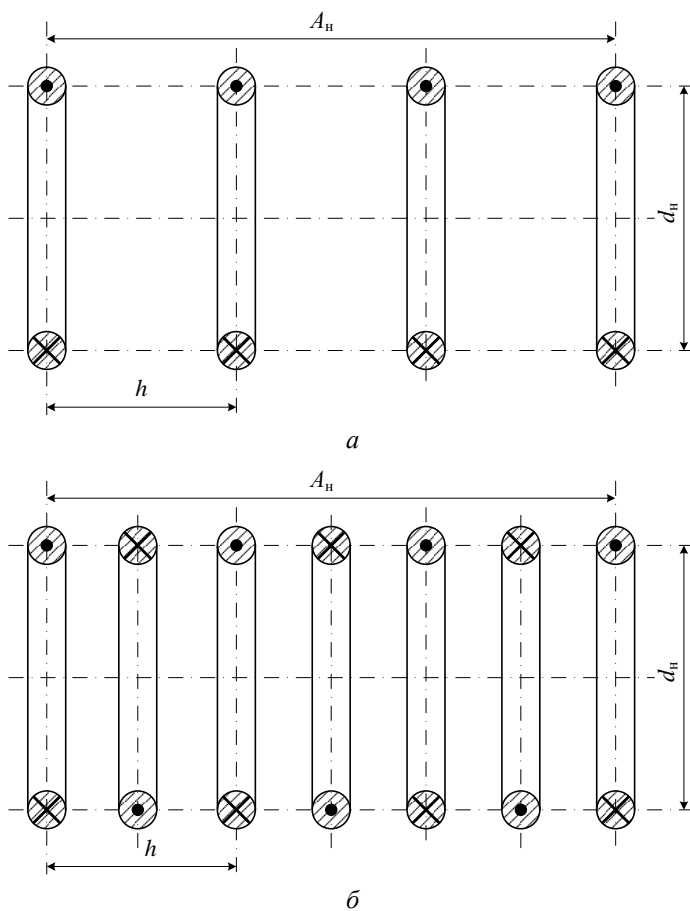


Рисунок 3.1 – Модели намоток для расчета индуктивности

Если  $\alpha > 1$ , то

$$\Phi = \frac{\pi^2}{2\alpha^2} \left( \frac{1}{\beta} - \frac{8}{3\pi} - \frac{\beta^3}{8} + \frac{\beta^5}{16} - \frac{15}{128}\beta^7 + \frac{21}{128}\beta^9 - \frac{315}{1024}\beta^{11} + \dots \right), \quad (3.7)$$

где  $\beta = \frac{1}{\sqrt{1+4\alpha^2}}$ .

Если  $\alpha \leq 1$ , то

$$\Phi = 2\pi \left[ \left( 1 + \frac{\alpha^2}{8} - \frac{\alpha^4}{64} + \dots \right) \ln \frac{4}{\alpha} - \frac{1}{2} + \frac{\alpha^2}{32} + \frac{\alpha^4}{96} + \dots \right]. \quad (3.8)$$

При необходимости может быть произведен более точный расчет с учетом изоляции (шага намотки), методика которого приведена в [5].

3.2.2. Точный расчет индуктивности встречной намотки достаточно сложен. В общем случае индуктивность встречной намотки может быть рассчитана по методике, изложенной в [6], с использованием расчетной модели, показанной на рис. 3.1б. Обратим внимание, что в приведенной модели направление тока в витках изменяется поочередно.

На практике можно использовать следующие оценки индуктивности встречной намотки, полученные экспериментальным путем: при диаметре намотки  $d_n = 71 - 86$  мм, шаге намотки  $h = 7 - 20$  мм, количестве витков  $\omega = 1 - 32$  удельная индуктивность не превышает  $L_{уд} = 0,08$  мкГн / виток. Тогда индуктивность катушки с встречной намоткой и параметрами, находящимися в оговоренных выше диапазонах, в мкГн

$$L = 0,08\omega. \quad (3.9)$$

Под количеством витков намотки понимается количество витков одной проволоки.

### 3.3. Расчет теплового режима

Особенностью теплового режима защитных резисторов есть их практически мгновенный нагрев и отсутствие теплообмена с окружающей средой за время нагрева (адиабатический нагрев).

В этом случае перегрев проводящего элемента  $\Theta$  относительно начальной температуры определяется по формуле

$$\Theta = \frac{W}{cm}, \quad (3.10)$$

где  $W$  – энергия, поглощаемая резистором;  $c$  – удельная теплоемкость материала проводящего элемента (см. в табл. П.3);  $m$  – масса проводящего элемента.

Масса проводящего элемента определяется по формуле

$$m = \gamma A_{\text{пр}} S_{\text{пр}}, \quad (3.11)$$

где  $\gamma$  – плотность материала (см. в табл. П.3);  $A_{\text{пр}}$  – длина проводящего элемента, определяемая по (3.4) – (3.5);  $S_{\text{пр}}$  – площадь поперечного сечения проводящего элемента.

Величина максимального перегрева не должна превышать допустимой температуры эксплуатации изоляционного каркаса и материала банджа, т.е.  $T = \Theta + 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{доп}}$ . Показатели нагревостойкости изоляционных материалов приведены в приложении П.5. При использовании в качестве каркаса бумажно-бакелитовых и текстолитовых изделий следует принимать  $\Theta \leq 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , стеклотекстолитовых на эпоксидном связующем –  $\Theta \leq 135 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .



### 3.4. Электрическая прочность

Электрическая прочность конструкции резистора – это свойство резистора выдерживать без пробоя внутри и по поверхности напряжение, которое прикладывается к нему.

Электрическая прочность проволочных резисторов обеспечивается выбором средней напряженности электрического поля вдоль их поверхности. На практике принимают  $E = 4 \text{ кВ} / \text{см} = 4 \cdot 10^5 \text{ В} / \text{м}$  [7].

Для исключения коронирования фланцы резистора снабжаются экранами (см. рис. 2.1) или выполняются с дополнительными скругленными поверхностями, выступающими за аксиальный размер каркаса (см. рис. 2.2).

#### 4. Блоки защитных резисторов на базе резисторов ТВО

4.1. Резисторы промышленного изготовления выпускаются со значениями номинальной величины сопротивления, находящимися в определенном диапазоне и соответствующими некоторому ряду сопротивлений [8]. Диапазоны изменения номинального сопротивления резисторов ТВО приведены в табл. П.4.2.

4.2. Токоведущий элемент объемных резисторов типа ТВО, как показано на рис. 4.1, представляет собой последовательное соединение проводников различного сечения и проводимости: токоподвод – резистивный элемент – токоподвод.

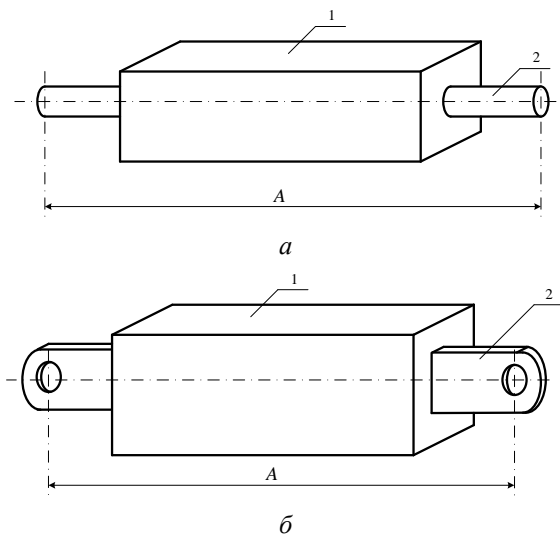


Рисунок 4.1 – Токоведущий элемент объемных резисторов типа ТВО:

*a* – резисторы ТВО-5, ТВО-10, ТВО-20; *б* – резистор ТВО-60;

1 – резистивный элемент; 2 – токоподвод

Точный расчет индуктивности таких конструкций достаточно сложен [5]. Поэтому на практике пользуются оценкой индуктивности,

что допустимо в силу малости индуктивности объемных резисторов по сравнению с индуктивностью других элементов разрядной цепи.

Как известно [5], индуктивность прямолинейного проводника тем меньше, чем больше его сечение. Это позволяет дать оценку индуктивности "сверху", принимая в качестве расчетной модели токопроводящих элементов резистора проводник длиной  $A$  с сечением, равным сечению токоподводов, и оценку "снизу", принимая в качестве расчетной модели токопроводящих частей резистора проводник длиной  $A$  с сечением, равным сечению резистивного элемента. Таким образом, оценка индуктивности объемных резисторов может быть произведена с помощью соотношений для определения индуктивности прямолинейных проводов кругового и прямоугольного сечения, приведенных, например в [5].

Для прямолинейного проводника кругового сечения

$$L = \frac{\mu_0 A}{2\pi} \left( \ln \frac{2A}{r} - \frac{3}{4} + \frac{128r}{45\pi A} - \frac{r^2}{4A^2} \right), \quad (4.1)$$

где  $L$  – индуктивность провода;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $A$  – длина провода;  $r$  – радиус поперечного сечения провода.

Для прямолинейного провода прямоугольного сечения

$$L = \frac{\mu_0 A}{2\pi} \left( \ln \frac{2A}{b+c} + \frac{1}{2} \right), \quad (4.2)$$

где  $b$ ,  $c$  – стороны прямоугольника, являющегося поперечным сечением провода.

Оценка индуктивности резисторов приведена в табл. 4.1.

4.3. Электрическая прочность резисторов промышленного изготовления достигается заданием режимов и условий эксплуатации, а

также способов крепления, предусмотренных в технических условиях на них. В случае их изменения необходимы специальные испытания.

Таблица 4.1 – Индуктивность резисторов ТВО

Тип резистора	Оценка индуктивности резистора, Гн	
	нижняя	верхняя
ТВО-5	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$
ТВО-10	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$
ТВО-20	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$
ТВО-60	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$

4.4. Блоки резисторов. При проектировании высоковольтных устройств применение блоков резисторов ТВО целесообразно в следующих случаях:

- 1) энергия, которую необходимо поглотить, больше энергии, которую может поглотить единичный резистор без нарушения его работоспособности;
- 2) необходима регулировка параметров процесса протекания тока путем изменения схемы;
- 3) отсутствие единичных резисторов с необходимыми параметрами.

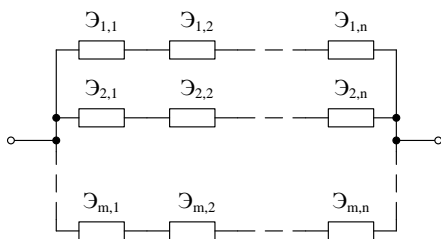
Применение блоков защитных резисторов в основном связано с пунктом 1).

Электрическая схема блока резисторов в общем случае представляет собой последовательно-параллельное соединение единичных элементов. Варианты такого соединения представлены на рис. 4.2.

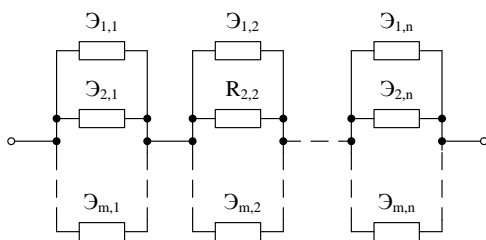
Как видно из рис. 4.2, сопротивление блока  $R_B$  при любой схеме соединения элементов

$$R_B = R \frac{n}{m}, \quad (4.3)$$

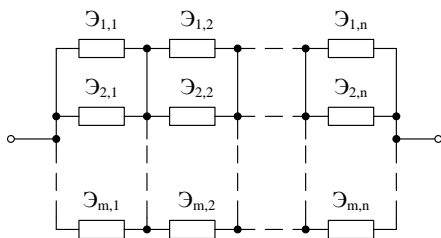
где  $R = R_{1,1} = R_{1,2} = \dots = R_{m,n}$  – сопротивление единичного элемента;  $n$  – количество последовательно соединенных элементов в блоке;  $m$  – количество параллельно соединенных элементов в блоке.



*a*



*б*



*в*

Рисунок 4.2 – Схема соединения единичных элементов в блоке:

*a* – параллельное соединение групп последовательно соединенных элементов;

*б* – последовательное соединение групп параллельно соединенных элементов;

*в* – последовательно-параллельное соединение элементов

Аналогичное соотношение имеет место для определения индуктивности блока  $L_B$ :

$$L_B = L \frac{n}{m}, \quad (4.4)$$

где  $L = L_{1,1} = L_{1,2} = \dots = L_{m,n}$  – индуктивность единичного элемента.

Обратим внимание на то, что формула (4.4) справедлива при отсутствии взаимоиндуктивности между элементами (идеализированная расчетная модель индуктивности блока). На практике (4.4) можно использовать, если взаимоиндуктивность между рядом расположенными элементами, по крайней мере, на порядок меньше индуктивности единичного элемента. Если это условие не выполняется, то расчет необходимо производить с учетом взаимной индуктивности единичных элементов, например по рекомендациям, изложенным в [5]. Оценка взаимной индуктивности может быть проведена только на стадии разработки конструкции блока, а при первоначальных расчетах используется оценка индуктивности по формуле (4.4).

Приведем еще два соотношения, вытекающих из теории электрических цепей [9], справедливых при условии, что все элементы имеют одинаковое сопротивление и индуктивность.

Если единичный элемент рассчитан на эксплуатацию при номинальном напряжении  $U$ , то номинальное напряжение эксплуатации блока

$$U_B = nU. \quad (4.5)$$

Если единичный элемент в адиабатическом режиме поглощает энергию  $W$ , без нарушения его работоспособности, то энергия, которую может поглотить блок элементов, определяется по формуле

$$W_B = mnW. \quad (4.6)$$

## 5. Расчет параметров защитных резисторов

### 5.1. Общие требования

Резисторы должны удовлетворять требованиям к сопротивлению, индуктивности, термической стойкости и электрической прочности, изложенным в п. 1.3.

Резисторы должны иметь минимально возможные массогабаритные показатели.

В приложении П.6 показаны примеры выполнения общих видов защитных резисторов и фотографии ЕНЭ с установленными защитными резисторами.

### 5.2. Расчет проволочных резисторов

Решая совместно (3.1), (3.8) и (3.9) относительно длины и сечения проводящего элемента, получим

$$S_{\text{иö}} = \sqrt{\frac{W\rho}{c\Theta\gamma R}}; \quad (5.1)$$

$$A_{\text{иö}} = \sqrt{\frac{WR}{c\Theta\gamma\rho}}. \quad (5.2)$$

В приведенных соотношениях поглощаемая энергия  $W$  и сопротивление  $R$  известны из электрических расчетов. Удельная теплоемкость  $c$ , плотность  $\gamma$  и удельное электрическое сопротивление  $\rho$  становятся известными после выбора материала проводящего элемента. Допускаемый перегрев  $\Theta$  определяется принятым материалом изоляционного каркаса.

Таким образом, определенные по (5.1) и (5.2) сечение и длина проводящего элемента являются наименьшими, удовлетворяющими величине перегрева и сопротивления.

Зная сечение, из (3.2) определяем диаметр проволоки

$$d_{\text{и}\delta} = \sqrt{\frac{4S_{\text{и}\delta}}{k_{\text{и}\delta} \pi}}. \quad (5.3)$$

Сначала задаем  $k_{\text{пр}} = 1$ . Если вычисленный диаметр проволоки будет более 2 мм, то, в связи со сложностями намотки такой проволоки, целесообразно принять  $k_{\text{пр}} = 2$  и повторить расчет. При повторении ситуации принимают  $k_{\text{пр}} = 3$  и так далее.

Требования к индуктивности защитного резистора и его электрической прочности удовлетворяются выбором диаметра намотки  $d_{\text{н}}$  и шага намотки  $h$ , которые при известной длине проводящего элемента  $A_{\text{пр}}$  определяют количество витков намотки  $\omega$  из (3.3) и (3.4), а также длину намотки  $A_{\text{н}}$  из (3.5).

Как видно из приведенных рассуждений, процесс определения параметров защитного резистора возможен только при проведении многовариантных расчетов, которые удобно проводить с использованием программного продукта Excel [10] (см. приложение П.2).

### 5.3. Пример расчета проволоочного резистора

5.3.1. Рассчитаем защитный резистор с обычной намоткой при следующих исходных данных: активное сопротивление резистора  $1,5 \text{ Ом} \leq R \leq 5 \text{ Ом}$ , индуктивность  $L \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$ , энергия, поглощаемая в аварийном режиме,  $W = 5 \cdot 10^4 \text{ Дж}$ , импульсное напряжение  $U = 3 \cdot 10^4 \text{ В}$ .

Примем в качестве материала проводящего элемента нихром марки Х15Н60 (см. табл. П.3.1), а в качестве каркаса стеклотекстолитовый цилиндр на эпоксидном связующем (см. приложение П.5). Тогда, используя соотношение (5.1), определим минимальную площадь поперечного сечения проводящего элемента:

$$S_{\text{и}\delta} = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^4 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6}}{0,461 \cdot 135 \cdot 8,2 \cdot 10^{-6} \cdot 5}} = 4,64 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$



Далее, принимая количество проволок проводящего элемента равным единице, определим диаметр проволоки по (5.3):

$$d_{\text{в}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,64 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 0,00243 \text{ м.}$$

Учитывая, что вычисленный диаметр проволоки более 2 мм, увеличиваем количество проволок на 1 и повторяем вычисления:

$$d_{\text{в}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,64 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \pi}} = 0,00172 \text{ м.}$$

Используя табл. П.3.2, принимаем ближайший больший диаметр  $d_{\text{в}} = 1,8 \text{ мм}$ .

Диаметр каркаса выбираем по табл. П.5.1  $d_{\text{к}} = 100 \text{ мм}$  (цилиндр с внутренним диаметром  $\varnothing 80 \text{ мм}$  и толщиной стенки  $10 \text{ мм}$ ). Принимаем намотку в винтовой паз и вычисляем диаметр намотки по формуле (2.2)  $d_{\text{н}} = 98,2 \text{ мм}$ . Минимальный шаг намотки определим из схемы расположения проволок в пазу, показанной на рис. 5.1.

$$h_{\text{min}} = t + 2d_{\text{в}} = 4 + 2 \cdot 1,8 = 7,6 \text{ мм}$$

Округляем до ближайшего большего значения из ряда, приведенного в табл. 3.1,  $h = 8 \text{ мм}$ .

Дальнейшие расчеты проволочного резистора удобнее производить в диалоговом режиме по программе, написанной на Excel, интерфейс которой показан на рис. 5.2, а содержимое ячеек на рис. 5.3.

Результаты расчета показаны на рис. 5.4. После ввода свойств проводникового материала, электротехнических характеристик резистора, диаметра проволоки, количества проволок, диаметра намотки и величины шага содержимое столбца "С" имеет вид, показанный в столбце "Номер расчета 0".

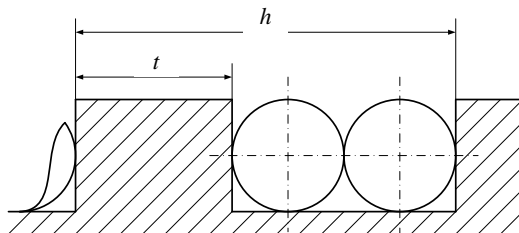


Рисунок 5.1 – Схема расположения проволок

Следующим шагом определим количество витков, удовлетворяющее величине сопротивления. Для этого используем процедуру **"Подбор параметра"** (см. приложение П.2) или постепенное увеличение числа витков на единицу. Результаты расчета приведены на рис. 5.4 в столбце "Номер расчета 1". Как видно из расчета, величина перегрева, сопротивление и напряженность электрического поля вдоль поверхности резистора удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, однако значение индуктивности больше допустимого.

Для уменьшения индуктивности резистора увеличим шаг намотки, выбирая большие значения из ряда, приведенного в табл. 3.1. Результаты расчетов показаны на рис. 5.4 в столбцах "Номер расчета 2, 3 и 4". При шаге  $h = 14$  мм все требования, предъявляемые к резистору, будут удовлетворены.

5.3.2. Расчет защитных резисторов со встречной намоткой производится аналогично со следующей корректировкой и некоторыми ограничениями:

- количество проволок должно быть четным;
- для расчета индуктивности в ячейку **C31** вводится формула (3.5) в виде: "**=0,00000008\*C13**", а ячейки **C25 – C30** не используются;
- количество витков, диаметр намотки и величина шага должны соответствовать п. 3.2.2.

	A	B	C	D
1	<b><u>Исходные данные</u></b>			
2	<b>Свойства проводникового материала</b>			
3	Удельное сопротивление	$\rho =$	1,10E-06	Ом·м
4	Плотность	$\gamma =$	8,20E+06	г/м <sup>3</sup>
5	Удельная теплоемкость	$c =$	0,461	Дж/(г·К)
6	<b>Электрические характеристики</b>			
7	Поглощаемая энергия	$W =$	5,00E+04	Дж
8	Прикладываемое напряжение	$U =$	3,00E+04	В
9	<b>Параметры конструкции</b>			
10	Диаметр проволоки	$d_{np} =$	1,80E-03	м
11	Количество проволок	$k_{np} =$	2	
12	Диаметр намотки	$d_n =$	9,82E-02	м
13	Количество витков	$\omega =$	20	
14	Шаг намотки	$h =$	8,00E-03	м
15				
16	<b><u>Расчетные данные</u></b>			
17	Длина витка	$A_v =$	3,09E-01	м
18	Длина проволоки	$A_{np} =$	6,17E+00	м
19	Длина намотки	$A_n =$	1,60E-01	м
20	Площадь сечения проволоки	$S_{np} =$	5,09E-06	м <sup>2</sup>
21	Масса проволоки	$m =$	2,58E+02	г
22	Перегрев проволоки	$\Theta =$	4,21E+02	К
23	Активное сопротивление	$R =$	1,33E+00	Ом
24	Напряженность ЭП вдоль пов-ти	$E_{пов} =$	1,88E+05	В/м
25	Отношение $A_n/d_n$	$\alpha =$	1,63E+00	
26		$\beta =$	2,93E-01	
27	Буферная переменная	$x =$	2,56E+00	
28		$\Phi(\alpha > 1) =$	4,75E+00	
29		$\Phi(\alpha \leq 1) =$	4,74E+00	
30	Козф-т для расчета индуктивности	$\Phi =$	4,753E+00	
31	Индуктивность	$L =$	1,867E-05	Гн

Рисунок 5.2 – Интерфейс программы расчета проволочных резисторов с обычной намоткой на цилиндрическом каркасе

	B	C
1		
2		
3	$\rho =$	0,0000011
4	$\gamma =$	8200000
5	$c =$	0,461
6		
7	$W =$	50000
8	$U =$	30000
9		
10	$dnp =$	0,0018
11	$k_{np} =$	2
12	$dn =$	0,0982
13	$\omega =$	20
14	$h =$	0,008
15		
16		
17	$A_b =$	=КОРЕНЬ((ПИ()*C12)^2+C14^2)
18	$A_{np} =$	=C13*C17
19	$A_n =$	=C13*C14
20	$S_{np} =$	=C11*ПИ()*C10^2/4
21	$m =$	=C4*C18*C20
22	$\Theta =$	=C7/C5/C21
23	$R =$	=C3*C18/C20
24	$E_{пов} =$	=C8/C19
25	$\alpha =$	=C19/C12
26	$\beta =$	=1/КОРЕНЬ(1+4*C25^2)
27	$x =$	=(1/C26-8/3/ПИ()-C26^3/8+C26^5/16-15*C26^7/128+21*C26^9/128)
28	$\Phi(\alpha>1) =$	=ПИ()^2*(C27-315*C26^11/1024+297*C26^13/512)/2/C25^2
29	$\Phi(\alpha\leq 1) =$	=2*ПИ()*((1+C25^2/8-C25^4/64)*LN(4/C25)-1/2+C25^2/32+C25^4/96)
30	$\Phi =$	=ЕСЛИ(C25>1;C28;C29)
31	$L =$	=(0,0000001)*C13^2*C12*C30

Рисунок 5.3 – Содержимое ячеек программы

	Номер расчета				
	0	1	2	3	4
$\rho =$	1,10E-06	1,10E-06	1,10E-06	1,10E-06	1,10E-06
$\gamma =$	8,20E+06	8,20E+06	8,20E+06	8,20E+06	8,20E+06
$c =$	0,461	0,461	0,461	0,461	0,461
$W =$	5,00E+04	5,00E+04	5,00E+04	5,00E+04	5,00E+04
$U =$	3,00E+04	3,00E+04	3,00E+04	3,00E+04	3,00E+04
$d_{np} =$	1,80E-03	1,80E-03	1,80E-03	1,80E-03	1,80E-03
$k_{np} =$	2	2	2	2	2
$d_H =$	9,82E-02	9,82E-02	9,82E-02	9,82E-02	9,82E-02
$\omega =$		74	74	74	74
$h =$	8,00E-03	8,00E-03	1,00E-02	1,20E-02	1,40E-02
$A_B =$	3,09E-01	3,09E-01	3,09E-01	3,09E-01	3,09E-01
$A_{np} =$	0,00E+00	2,28E+01	2,28E+01	2,28E+01	2,29E+01
$A_H =$	0,00E+00	5,92E-01	7,40E-01	8,88E-01	1,04E+00
$S_{np} =$	5,09E-06	5,09E-06	5,09E-06	5,09E-06	5,09E-06
$m =$	0,00E+00	9,53E+02	9,53E+02	9,53E+02	9,54E+02
$\Theta =$	#ДЕЛ/0!	1,14E+02	1,14E+02	1,14E+02	1,14E+02
$R =$	0,00E+00	4,94E+00	4,94E+00	4,94E+00	4,94E+00
$E_{пов} =$	#ДЕЛ/0!	5,07E+04	4,05E+04	3,38E+04	2,90E+04
$\alpha =$	0,00E+00	6,03E+00	7,54E+00	9,04E+00	1,05E+01
$\beta =$	1,00E+00	8,27E-02	6,62E-02	5,52E-02	4,73E-02
$x =$	1,36E-01	1,12E+01	1,43E+01	1,73E+01	2,03E+01
$\Phi(\alpha>1) =$	#ДЕЛ/0!	1,53E+00	1,24E+00	1,04E+00	8,99E-01
$\Phi(\alpha\leq 1) =$	#ДЕЛ/0!	1,29E+02	3,87E+02	9,28E+02	1,92E+03
$\Phi =$	#ДЕЛ/0!	1,528E+00	1,239E+00	1,042E+00	8,989E-01
$L =$	#ДЕЛ/0!	8,214E-05	6,662E-05	5,603E-05	4,834E-05

Рисунок 5.4 – Результаты расчета

Пример выполнения общего вида проволочного резистора показан на рис. П.6.1.

#### 5.4. Расчет блока резисторов ТВО

Исходя из наибольшей поглощаемой блоком энергии  $W_B$ , определим наименьшее количество элементов, которое может содержать блок:

$$Q_{\min} = W_B / W, \quad (5.4)$$

где  $W$  – допустимая энергия, поглощаемая единичным резистором; для резисторов ТВО-10 и ТВО-60 определяется по материалам приложения П.4.

Исходя из максимального импульсного напряжения, прикладываемого к блоку  $U_{B \max}$ , определим наименьшее количество последовательно соединенных элементов, которое может содержать блок:

$$N_{\min} = U_{B \max} / U, \quad (5.5)$$

где  $U$  – максимально допустимое импульсное напряжение для единичного резистора, определяемое по табл. П.4.2.

Используя (5.4) и (5.5), определим количество параллельно соединенных элементов в блоке:

$$M = Q_{\min} / N_{\min}. \quad (5.6)$$

Из (4.3) расчетное значение сопротивления единичного элемента при заданном сопротивлении блока определится как

$$R_P = R_B \frac{m}{n}. \quad (5.7)$$

Подставим в (5.7) количество последовательно и параллельно соединенных элементов, определенных по соотношениям (5.5) и (5.6) и

определим расчетное значение сопротивления единичного элемента при данных условиях:

$$R_P = R_B \frac{M}{N_{min}}. \quad (5.8)$$

Сравним полученное значение с ближайшим значением из заданного ряда номинальных значений  $R_H^s$ , определяемое по табл. П.4.2 и табл. П.4.3. Если выполняется условие  $R_P = R_H^s$ , то выбор величины сопротивления единичного элемента считается окончанным. Однако на практике чаще всего расчетное значение сопротивления  $R_P$  отличается от ближайшего значения сопротивления ряда  $R_H^s$ . Принимаем ближайшее значение номинального сопротивления  $R_H^s$  и изменением количества последовательных и параллельных резисторов произведем подбор величины сопротивления блока в соответствии со следующей методикой.

При выбранном значении  $R_H^s$  расчетное значение сопротивления блока

$$R_{PB} = R_H^s \frac{n}{m}, \quad (5.9)$$

где  $n = N_{min}$ ;  $m = M$ .

Если в результате расчета по (5.9) получено  $R_{PB}$  значительно больше  $R_B$ , то необходимо увеличивать количество параллельно соединенных элементов  $m$  либо выбрать резистор с меньшим номинальным сопротивлением. Если получено  $R_{PB} < R_B$ , то необходимо увеличивать количество последовательно соединенных элементов  $n$  или выбрать резистор с большим номинальным сопротивлением. Критерием окончания процедуры подбора является величина относитель-

ного отклонения  $\Delta = 100 \frac{|R_B - R_{PB}|}{R_B} \%$ . На практике принимают

$$\Delta \leq 10 \%$$

Индуктивность блока резисторов рассчитывается после выбора количества последовательно и параллельно соединенных элементов по формуле (4.4).

### 5.5. Пример расчета блока резисторов

Требуется рассчитать блок резисторов ТВО-10, который имеет следующие параметры: максимальное выдерживаемое импульсное напряжение – 20 кВ, максимальную поглощаемую энергию – 10 кДж, активное сопротивление – не более 10 Ом, индуктивность – не более 2 мкГн.

По выражению (5.4) определяем наименьшее количество элементов, которое может содержать блок. Энергию, поглощаемую одним резистором, принимаем равной 800 Дж (см. приложение П.4).

$$Q_{\min} = 1 \cdot 10^4 / 600 = 16,7 \approx 17 \text{ ед.}$$

Наименьшее количество последовательно соединенных резисторов определим по выражению (5.5). Максимально допустимое импульсное напряжение одного резистора принимаем равным 10 кВ (см. табл. П.4.2).

$$N_{\min} = 2 \cdot 10^4 / 1 \cdot 10^4 = 2 \text{ ед.}$$

Количество параллельно соединенных элементов в блоке

$$M = 17/2 = 8,5 \approx 9 \text{ ед.}$$



Расчетное значение сопротивления единичного резистора определим по выражению (5.8):

$$R_P = 10 \cdot \frac{9}{2} = 45 \text{ Ом.}$$

Принимаем ближайшее значение из ряда (см. табл. П.4.3)  
 $R_P = 47 \text{ Ом.}$

При избранном значении  $R_P$  расчетное значение сопротивления блока

$$R_{PB} = 47 \cdot \frac{2}{9} = 10,44 \text{ Ом,}$$

что больше заданного. Поэтому принимаем ближайшее меньшее значение сопротивления единичного резистора из ряда, приведенного в табл. П.4.3,  $R_P = 43 \text{ Ом.}$  Для этого значения

$$R_{PB} = 43 \cdot \frac{2}{9} = 9,56 \text{ Ом,}$$

что удовлетворяет заданным условиям.

Индуктивность блока резисторов рассчитывается по формуле (4.4). Индуктивность единичного резистора принимаем равной 0,19 мкГн (см. табл. 4.1).

$$L_B = 1,9 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{2}{9} = 4,22 \cdot 10^{-8} \text{ Гн.}$$

Все заданные требования удовлетворены.

Примеры выполнения общего вида блоков резисторов показаны на рис. П.6.2 и П.6.3.

## Контрольные вопросы

1. С чем связана необходимость разбиения батареи накопительных конденсаторов на отдельные модули?
2. Какова цель защиты конденсаторов батареи при прибое одного из них?
3. Как организовывается защита конденсаторной батареи?
4. Какие существуют основные схемы защиты конденсаторов с помощью разделительных защитных резисторов?
5. Сформулируйте основные требования к защитным резисторам в схеме с резисторами, включенными в основную цепь разряда ЕНЭ.
6. Сформулируйте основные требования к защитным резисторам в кольцевой схеме.
7. Какие элементы могут использоваться в качестве защитных резисторов?
8. Назовите основные типы намоток проволочных резисторов.
9. Назовите типоразмеры резисторов ТВО, наиболее часто используемые в качестве защитных резисторов.
10. Какие модели намоток используются при расчете индуктивности проволочных резисторов?
11. Каким образом оценивается индуктивность резисторов ТВО?
12. В чем заключается необходимость использования блоков резисторов?
13. Чему равно сопротивление блока резисторов?
14. Чему равна индуктивность блока резисторов?
15. Как определяется допустимая энергия, поглощаемая блоком в адиабатическом режиме?
16. Сформулируйте общие требования к защитным резисторам.
17. Какие изделия используются в качестве изоляционных каркасов проволочных резисторов индивидуального изготовления?

## Контрольные задания

При заданных наибольших значениях: воздействующего импульсного напряжения  $U$ , адиабатически выделяющейся энергии  $W$ , активного сопротивления  $R$  и индуктивности  $L$  произвести расчет защитных резисторов (блока защитных резисторов) в соответствии с заданиями.

### Задание 1

- 1) По данным соответствующего варианта в табл. 7.12 произвести расчет защитного проволочного резистора.
- 2) Выполнить эскиз резистора.

Таблица 7.1 – Варианты исходных данных

№ варианта	$U$ , кВ	$W$ , кДж	$R$ , Ом	$L$ , мкГн
1	30	20	2,7	15
2	100	28	2	10
3	20	30	2,3	25
4	5	30	2	10
5	30	4,5	4,5	25
6	100	4,5	4	30
7	25	10	4,8	10
8	50	5	4	25
9	30	10	5	15
10	10	6	5	35
11	20	7	5,1	10
12	50	7	5	15
13	30	5	13	35
14	100	8	3,7	10
15	20	6	2,9	10
16	50	7,5	3,2	35

### Задание №2

1) По данным соответствующего варианта в табл. 7.2 произвести расчет блока защитных резисторов с использованием резисторов ТВО-10 и ТВО-60.

2) Выполнить эскизы блоков. Расстояние между поверхностями двух резисторов в блоке принять: для резисторов ТВО-10 не менее 5 мм, для резисторов ТВО-60 не менее 10 мм.

3) Выбрать вариант с меньшими массогабаритными показателями. Иерархия показателей: масса блока резисторов, длина, объем блока резисторов. Если величины одинаковых показателей для различных вариантов исполнения блоков отличаются не более чем на 10 %, то считать, что данный показатель одинаков для рассматриваемых вариантов.

Таблица 7.2 – Варианты исходных данных

№ варианта	U, кВ	W, кДж	Rmax, Ом	Lmax, мкГн
1	2	3	4	5
1	3	2	2	0,5
2	10	2	2	1,0
3	20	3	2	0,5
4	50	3	2	1,0
5	3	4	4	0,5
6	10	4	4	1,0
7	20	5	4	1,0
8	50	5	4	1,5
9	3	6	5	1,5
10	10	6	5	0,5
11	20	7	5	1,0

Окончание таблицы 7.2

1	2	3	4	5
12	50	7	5	1,5
13	3	8	3	0,5
14	10	8	3	1,0
15	20	9	3	1,0
16	50	9	3	0,5

### Список литературы

1. Колиушко Г.М. Основные принципы построения системы защиты в аварийных режимах при работе емкостных накопителей энергии / Г.М. Колиушко : тезисы докладов расширенного заседания секции IV научного совета АН СССР на тему : "Емкостные накопители энергии в электрофизических установках предельных параметров". – Харьков : ХПИ, 1981. – С. 5 – 6.

2. Колиушко Г.М. Анализ схем защиты мощных магнитно-импульсных установок с использованием резисторов на стадии заряда / Г.М. Колиушко, В.В. Конотоп // Вестник Харьковского политехнического института. Тематический выпуск : Магнитно-импульсная обработка металлов. – Харьков : Вища школа. – 1977. – №4. – С. 66 – 71.

3. Резисторы постоянные непроволочные ТВО, С4-2. Технические условия. ОЖО.467.121 ТУ.

4. Краткий справочник конструктора радиоэлектронной аппаратуры / Р.Х. Бальян, Н.А. Барканов, А.В. Борисов и др. ; под ред. Р.Г. Варламова. – М. : Сов. радио, 1972. – 856 с.

5. Калантаров И.Л. Расчет индуктивностей : Справочная книга / И.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.

6. Немцов М.В. Справочник по расчету катушек индуктивности / М.В. Немцов – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.

7. Смирнов С.М. Генераторы импульсов напряжения / С.М. Смирнов, П.В. Терентьев. – М. : Энергия, 1964. – 239 с.

8. ГОСТ 2825-67. Резисторы постоянные. Ряды номинальных сопротивлений. – М. : Издательство стандартов, 1973. – 4 с.

9. Татур Т.А. Основы теории электрических цепей (справочное пособие) : учеб. пособие / Т.А. Татур. – М. : Высш. школа, 1980. – 271 с.

10. Коттингхэм М. Excel 2000: руководство разработчика / М. Коттингхэм : пер. с англ. – К. : Издательская группа BVH, 2000. – 704 с.

11. Материалы в машиностроении. Выбор и применение: справочник : в 5 т. ; под общ. ред. И.В. Кудрявцева. Т. 3. Специальные стали и сплавы ; под ред. Ф.Ф. Химушина. – М. : Машиностроение, 1968. – 448 с.

12. Петков А.А. Усовершенствование разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с учетом критериев их надежности : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.09.13 "Техника сильных электрических и магнитных полей" / А.А. Петков. – Харьков, 2004. – 205 с.

13. Баранов М. И. Предельные характеристики по рассеиваемой импульсной мощности и энергии высоковольтных керамических объемных резисторов типа ТВО – 60. / М. И. Баранов, В. А. Бочаров, М. А. Носенко // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт": сб. научн. тр. Тематический выпуск : Техника и электрофизика высоких напряжений. – Харьков : НТУ "ХПИ". – №20. – 2007. – С. 45 – 56.

14. Электротехнический справочник. Т. 1 ; под общей редакцией П.Г. Грудинского. – М. : Энергия, 1974. – 776 с.

## Приложение 1

### Краткий терминологический словарь

**Адиабатический процесс** –термодинамический процесс (в частном случае процесс выделения тепла), который происходит в системе без теплообмена с внешними телами.

**Индуктивность взаимная** – отношение потока взаимной индукции одного из двух контуров к силе тока, обуславливающей его, в другом контуре.

**Индуктивность собственная** –отношение потока самоиндукции контура к току в нем.

**Плотность вещества** –масса единичного объема.

**Резистор** – электро- и радиотехнический элемент, проявляющий при протекании электрического тока преимущественно свойство активного сопротивления.

**Соленоид** – цилиндрическая катушка, состоящая из большого количества витков проволоки, образующих винтовую линию.

**Сопротивление активное** – свойство проводника ограничивать величину тока после приложения к нему напряжения, обусловленное физическими и геометрическими характеристиками проводника.

**Сопротивление омическое** – см. сопротивление активное.

**Сопротивление электрическое удельное** – сопротивление однородного проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения  $1 \text{ м}^2$ .

**Теплоемкость** – количество теплоты, которое необходимо передать телу для нагревания на один кельвин.

**Теплоемкость удельная средняя** – количество теплоты, которое необходимо передать для нагревания единицы массы тела на один кельвин.

**Электрическая прочность резистора** – свойство резистора выдерживать без пробоя внутри и по поверхности прикладываемое к нему напряжение.

## Приложение 2

### Использование электронных таблиц Excel для расчетов защитных резисторов

В данном приложении рассмотрены основные приемы проведения вычислений по соотношениям, применяемым для расчетов защитных резисторов, а также используемые при этом встроенные функции.

При этом предполагается, что пользователи знакомы с основами работы в программной среде Excel [10]:


- ввод текста и чисел в ячейки;
- форматирование содержимого ячейки;
- проведение элементарных арифметических вычислений.

При вычислении индуктивности защитных резисторов необходимо использовать ряд встроенных в Excel функций. Их ввод осуществляется с помощью **Мастера функций**. Для этого необходимо выбрать требуемую ячейку (или позицию в содержимом ячейки) и нажать кнопку  $f_x$  на панели инструментов. В результате на экране появится диалоговое окно **Мастера функций**, вариант которого показан на рис. П.2.1. Используя это окно, можно выбрать необходимую функцию.

При расчетах защитных резисторов часто используется число  $\pi = 3,1415...$ . В Excel имеется функция **ПИ( )**, которая возвращает значение этого числа с большим количеством значащих цифр. После выбора этой функции появляется диалоговое окно, показанное на рис. П.2.2. Следует отметить, что данная функция не имеет аргументов.

Функции вычисления квадратного корня **КОРЕНЬ(число)** и натурального логарифма **LN(число)**, диалоговые окна которых показаны на рис. П2.3 и П2.4, имеют по одному аргументу, помещаемому в поле "число". В поле могут быть введены числа, ссылки на ячейки и



другие функции. Справа от поля "**число**" расположена кнопка , которая

Продолжение приложения 2

позволяет сворачивать окно до размеров поля, что обеспечивает удобный выбор информации и ее ввод в поле.

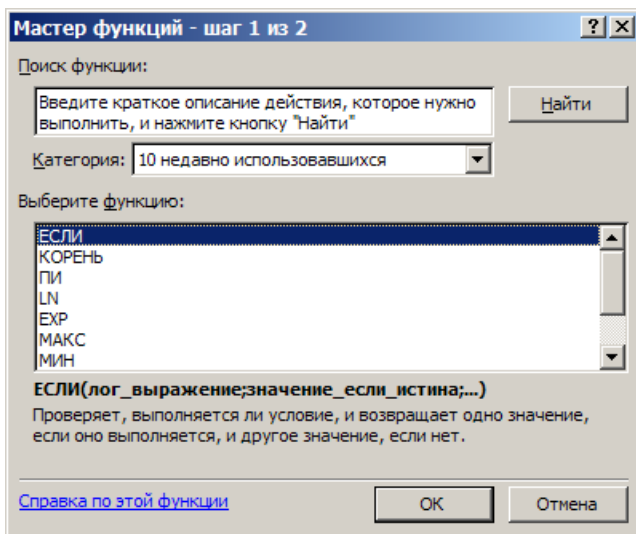


Рисунок П.2.1 – Диалоговое окно **Мастер функций**

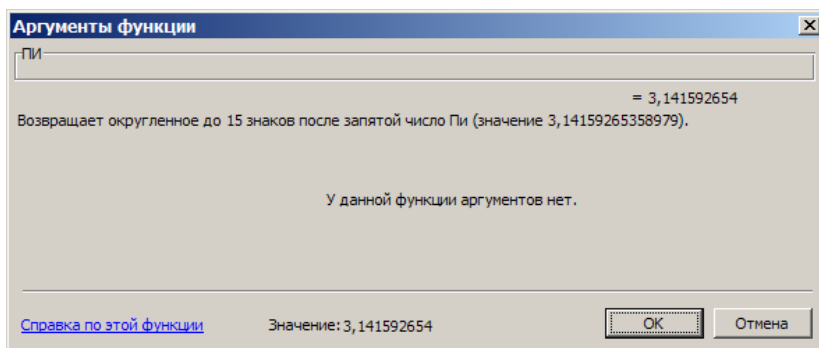


Рисунок П.2.2 – Диалоговое окно функции **ПИ()**

Продолжение приложения 2

На рис. П.2.3 показан пример вычисления корня квадратного из суммы содержимого двух ячеек **A3+B5**.

На рис. П.2.4 показан пример вычисления натурального логарифма квадрата содержимого ячейки **A5**, умноженного на число  $\pi$  с добавлением содержимого ячейки **A51**.

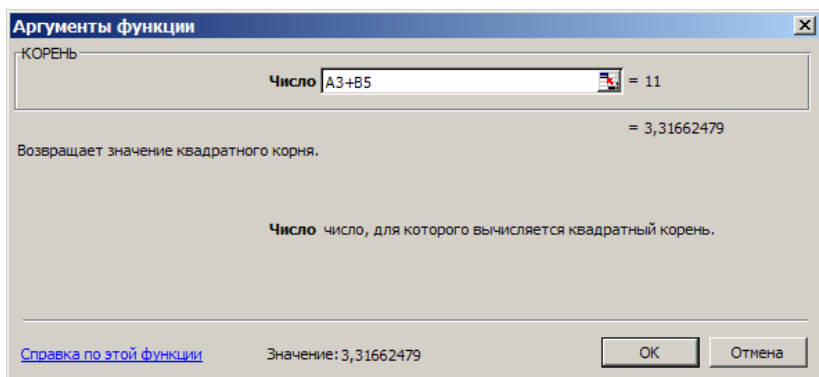


Рисунок П.2.3 – Диалоговое окно функции **КОРЕНЬ()**

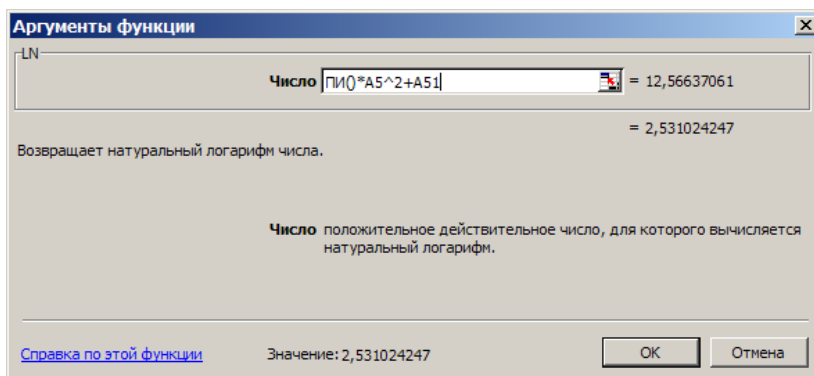


Рисунок П.2.4 – Диалоговое окно функции LN()

Продолжение приложения 2

Для выбора варианта вычисления по заданному условию используется функция **ЕСЛИ(лог\_выражение; значение\_если\_истина; значение\_если\_ложь)**, диалоговое окно которой показано на рис. П.2.5. В позицию "лог\_выражение" вводится условие выбора. В примере условием выбора является положительность произведения содержимого ячеек **A3** и **A4**.

В позицию "значение\_если\_истина" вводится строка, определяющая значение, возвращаемое функцией при выполнении логического условия. В примере – сумма содержимого ячеек **A3+A4**. В позицию "значение\_если\_ложь" строка, определяющая значение, возвращаемое функцией при невыполнении логического условия. В примере – содержимое ячейки **C5**.

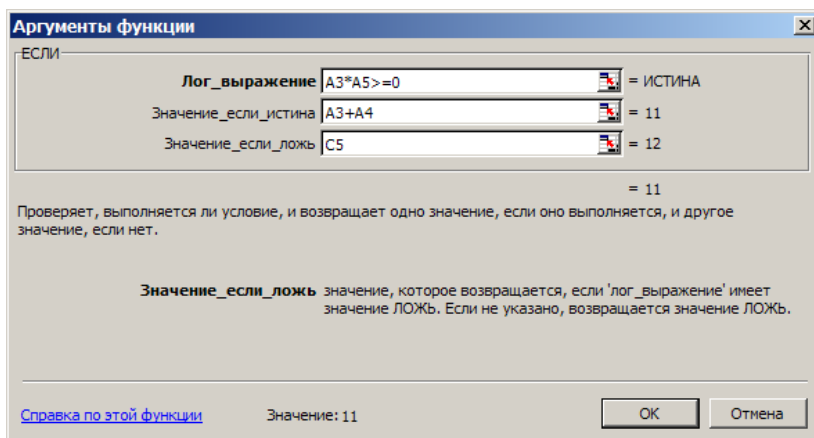


Рисунок П.2.5 – Диалоговое окно функции **ЕСЛИ()**

Содержимое ячейки (в том числе и введенные формулы) можно посмотреть в **строке формул**, выделив соответствующую ячейку. Если необходимо просмотреть содержимое всех ячеек листа, то следует набрать начиная с основного меню **Сервис / Параметры / закладка Вид** и установить флаг в позиции **формулы**, как показано на рис. П.2.6. Возврат в исходное состояние осуществляется снятием флага.

Продолжение приложения 2

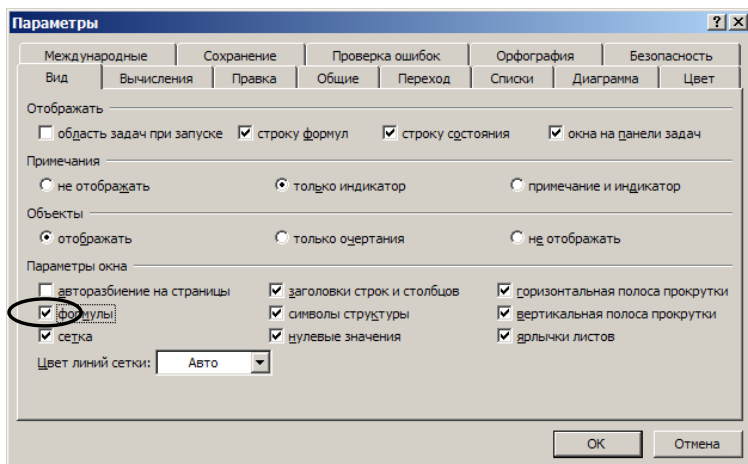
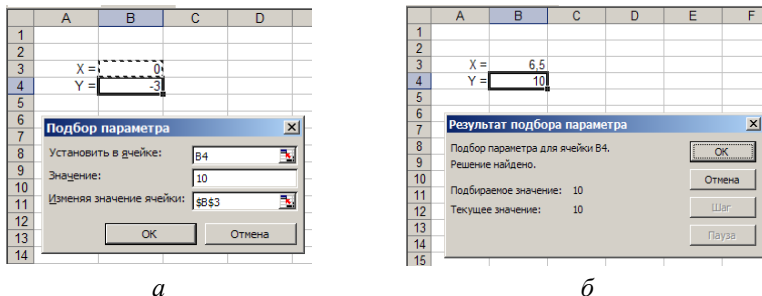


Рисунок П.2.6 – Вид диалогового окна **Параметры**

При расчетах защитных резисторов удобно использовать процедуру **Подбор параметра**. Для ее активизации необходимо набрать, начиная с основного меню **Сервис / Подбор параметра ...**. На рис. П.2.7 показан пример подбора значения  $X$  в уравнении  $Y = 2X - 3$ , при котором  $Y$  принимает значение, равное 10. На рис. П.2.7а показано исходное состояние до выполнения процедуры, на рис. П.2.7б – после ее выполнения.



*a*

*б*

Рисунок П.2.7 – Пример подбора параметров

### Приложение 3

#### **Характеристики проводниковых материалов с высоким омическим сопротивлением**

При изготовлении защитных резисторов используют две группы проводниковых материалов с высоким омическим сопротивлением. К первой группе относятся сплавы для электронагревателей (представитель – нихром), ко второй – для элементов сопротивлений и реостатов (манганин, константан). Физические характеристики сплавов приведены в табл. П.3.1.

Таблица П.3.1 – Физические характеристики сплавов с высоким омическим сопротивлением [11]

Наименование, марка материала	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Удельная теплоемкость, кДж / (кг·К)	Плотность, кг / м <sup>3</sup>
Константан			
МНМц 40-1,5	$0,45 \cdot 10^{-6} - 0,52 \cdot 10^{-6}$	0,409	$8,9 \cdot 10^3$
Манганин			
МНМц 3-12	$0,47 \cdot 10^{-6} - 0,48 \cdot 10^{-6}$	0,408	$8,4 \cdot 10^3$
Нихром			
X15H60	$1,06 \cdot 10^{-6} - 1,17 \cdot 10^{-6}$	0,461	$8,2 \cdot 10^3$
X20H80	$1,02 \cdot 10^{-6} - 1,17 \cdot 10^{-6}$	0,419	$8,4 \cdot 10^3$

Основными свойствами материалов первой группы являются: высокая жаростойкость, высокое электрическое сопротивление, достаточная крипоустойчивость (обеспечивает сохранение геометрии нагревателей), удовлетворительная пластичность в холодном состоянии (обеспечивает возможность изготовления нагревателей).

Основными свойствами материалов первой группы являются: высокое электросопротивление, малая величина температурного коэффициента электросопротивления, неизменяемость электрических свойств во времени.

Ряды диаметров выпускаемой проволоки с высоким омическим сопротивлением приведены в табл. П.3.2.

Таблица П3.2 – Ряд диаметров провода [11]

Наименование материала	Ряд диаметров, мм
Константан	0,1; 0,12; 0,14; 0,15; 0,16; 0,18; 0,2; 0,22; 0,25; 0,28; 0,3; 0,33; 0,35; 0,38; 0,4; 0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80; 0,85; 0,90; от 1,00 до 2,00 через 0,1; 2,25; 2,50; 2,75; 3,00; 3,50; 4,00; 4,5; 5,00
Манганин	0,1; 0,12; 0,14; 0,15; 0,16; 0,18; 0,2; 0,22; 0,25; 0,28; 0,3; 0,35; 0,36; 0,38; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55; 0,56; 0,60; 0,63; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80; 0,85; 0,90; от 1,00 до 2,00 через 0,1; 2,00; 2,20; 2,50; 3,00; 3,60; 4,00; 4,50; 5,00; 6,00
Нихром	0,10; 0,11; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,2; 0,22; 0,25; 0,28; 0,30; 0,32; 0,40; 0,45; 0,50; 0,56; 0,60; 0,63; 0,70; 0,80; 0,90; 1,00; 1,10; 1,20; 1,40; 1,60; 1,80; 2,00; 2,20; 2,50; 2,80; 3,00; 3,20; 3,60; 4,00; 4,50; 5,00; 5,60; 6,00; 6,30; 7,00; 8,00; 9,00; 10,00

## Приложение 4

### Основные характеристики резисторов типа ТВО

Таблица П.4.1 – Массогабаритные характеристики

Тип резистора	Длина / с учетом выводов, мм	Размеры поперечного сечения, мм × мм	Масса, г
ТВО-5	77/ 130	11,5 × 9,5	30
ТВО-10	112/ 165	15 × 10,5	60
ТВО-20	112/ 165	22,5 × 19,5	155
ТВО-60	186/ 220 <sup>*)</sup>	47 × 28	не более 790

*Примечание.* \* – в состоянии поставки у резисторов ТВО-60 выводы расположены перпендикулярно продольной оси.

Таблица П.4.2 – Основные технические характеристики

Тип резистора	Пределы номинальных величин сопротивлений	Постоянное и переменное напряжение, В	Импульсное напряжение, В
ТВО-5	27 Ом – 1 МОм	1500	5000
ТВО-10		3000	10000
ТВО-20	24 Ом – 1 МОм	1400	9000
ТВО-60		2450	25000

Промежуточные значения номинального сопротивления резисторов получаются умножением коэффициентов ряда Е24 (см. табл. П.4.3) на  $10^n$ . Например, используя коэффициенты 3,9; 5,6; 9,1; 1,3; 6,2; 1, можно получить следующие значения номинального сопротивления:  $3,9 \cdot 10^1 = 39 \text{ Ом}$ ;  $5,6 \cdot 10^2 = 560 \text{ Ом}$ ;  $9,1 \cdot 10^3 = 9,1 \text{ кОм}$ ;  $1,3 \cdot 10^4 = 13 \text{ кОм}$ ;  $6,2 \cdot 10^5 = 620 \text{ кОм}$ ;  $1 \cdot 10^6 = 1 \text{ МОм}$ .



Таблица П.4.3 – Номинальные сопротивления по ряду E24

Индекс ряда	Коэффициенты ряда					
E24	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8
	1,1	1,6	2,4	3,6	5,1	7,5
	1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2
	1,3	2,0	3,0	4,3	6,2	9,1

Согласно [3] резисторы должны выдерживать воздействие импульсной нагрузки с параметрами:

- длительность импульса от 1 до 50 мкс;
- коэффициент перегрузки по мощности не более 1000;
- период повторения импульсов не менее 50 мкс

при средней мощности и импульсном напряжении не выше предельных значений.

Результаты испытаний резисторов типа ТВО–10–27 Ом, приведенные в [12], показывают, что при адиабатическом поглощении энергии резисторы допускают надежную работу в следующих режимах. При энергии импульса  $W = 800$  Дж допускаемое импульсное напряжение  $U = 4$  кВ и средняя рассеиваемая мощность  $P_{\text{ср}} = 6,7$  Вт, а при энергии импульса  $W = 600$  Дж допускаемое импульсное напряжение  $U = 10$  кВ и средняя рассеиваемая мощность  $P_{\text{ср}} = 7,7$  Вт.

Для резисторов ТВО-60-24 Ом допускаемая энергия, поглощаемая в адиабатическом режиме, может быть оценена по данным, приведенным в [13], как  $W = 1800$  Дж при допускаемом импульсном напряжении  $U = 25$  кВ и средней рассеиваемой мощности  $P_{\text{ср}}$  до 60 Вт.

Рекомендуемые величины энергии  $W$  справедливы при наработке резисторов до  $1 \cdot 10^4$  импульсов.

## Приложение 5

### Свойства изоляционных материалов

Таблица П.5.1 – Размеры мотанных электроизоляционных изделий [14]

Классификация на основе	Наименование изделия	Основные размеры, мм		
		внутренний диаметр	промежуточные значения внутреннего диаметра (кратные)	наименьшая толщина стенки
Бумажно-бакелитовые	Трубки	10–30	2 или 5	1,5
		32–80	2 или 5	1,5
	Цилиндры	85–150	5	2
		155–250	5	2
		255–350	5	2,5
Текстолитовые на бакелитовом связующем	Трубки	5–30	через 1 мм	1,5
	Цилиндры	32–75	2 или 5	5
		76–125	2 или 5	6
		126–500	2 или 5	7
Стеклотекстолитовые на эпоксидном связующем	Трубки	10–20	2 или 5	2–5
		22–80	2 или 5	2–10
	Цилиндры	85–400	5	3–20

Нагревостойкость бумажно-бакелитовых и текстолитовых изделий составляет 105 °С, стеклотекстолитовых на эпоксидном связующем 155 °С [14].

## Приложение 6

### Примеры выполнения резисторов

На рис. П.6.1 показан эскиз общего вида проволочного резистора с обычной намоткой в винтовой паз. Поверхность резистора покрыта лаковым слоем.

Блок резисторов ТВО-60, показанный на рис. П.6.2, собран на одной стороне изоляционной панели, которая прикрепляется к конструкции высоковольтного устройства с помощью болтового соединения через отверстия  $\varnothing 10,5$  мм. Блок подключается к разрядной цепи в местах подсоединения перемычек.

На рис. П.6.3 показан блок резисторов ТВО-60 с регулируемым сопротивлением. Резисторы крепятся к изоляционной панели с двух сторон. В местах крепления имеются цанговые разъемы, в которые вставляются съемные перемычки. Токоподвод осуществляется к верхним резисторам. Блок закрепляется на основании конструкции высоковольтного устройства посредством уголков и болтового соединения.

На рис. П.6.4 показан общий вид батареи накопительных конденсаторов, которые защищаются блоком резисторов ТВО-10, конструктивно выполненном в виде цилиндра.

Блоки защитных резисторов, показанные на рис. П.6.5, выполнены в открытом исполнении.

Защита конденсаторов единичными защитными резисторами показана на рис. П.6.6.

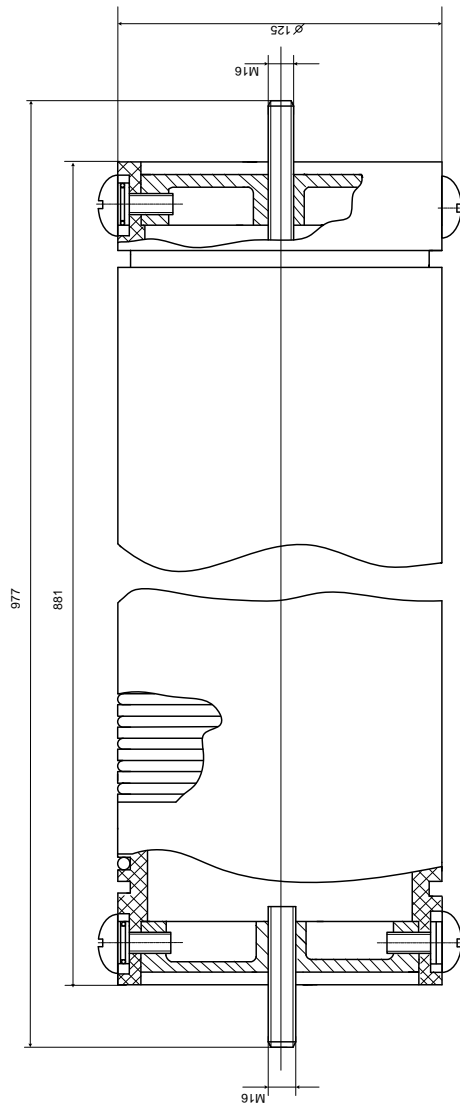


Рисунок П.6.1 — Проволочный резистор

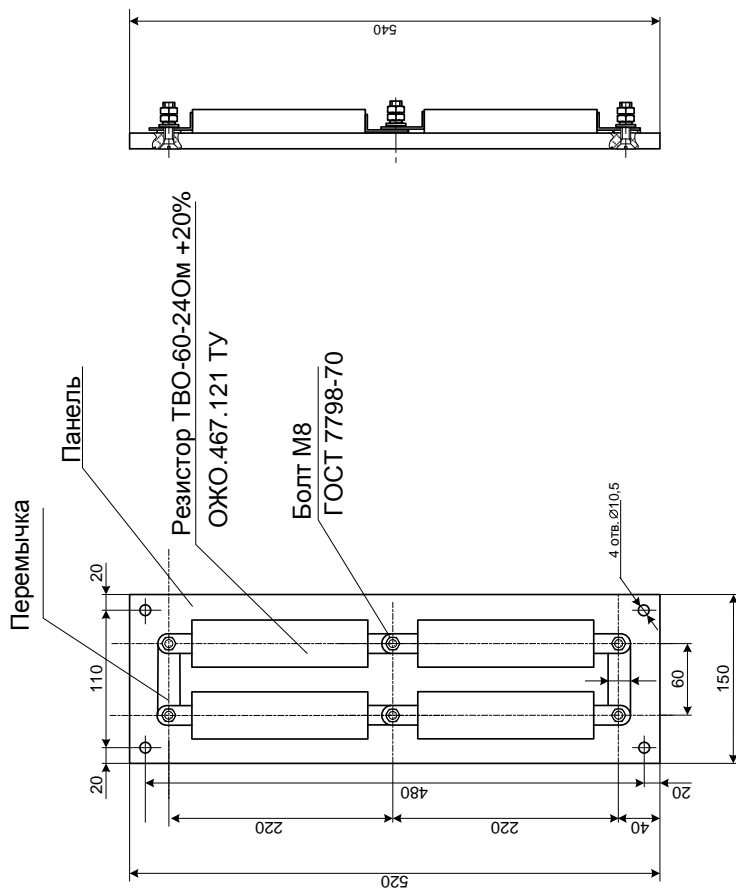


Рисунок П.6.2 – Блок резисторов ТВО-60

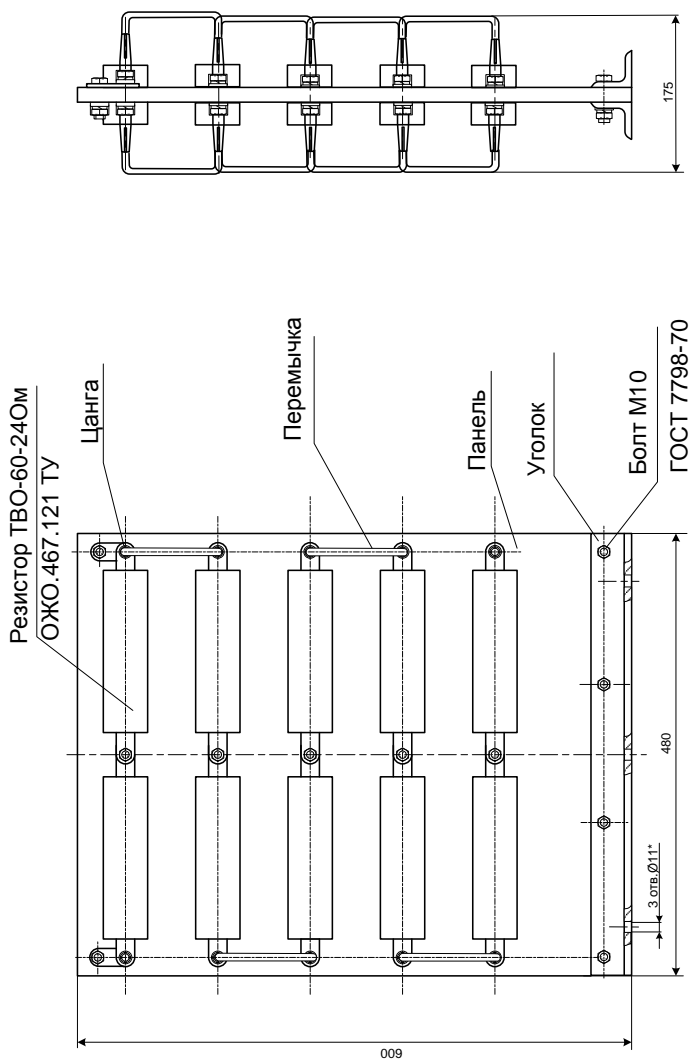


Рисунок П.6.3 – Блок резисторов ТВО-60 регулируемый

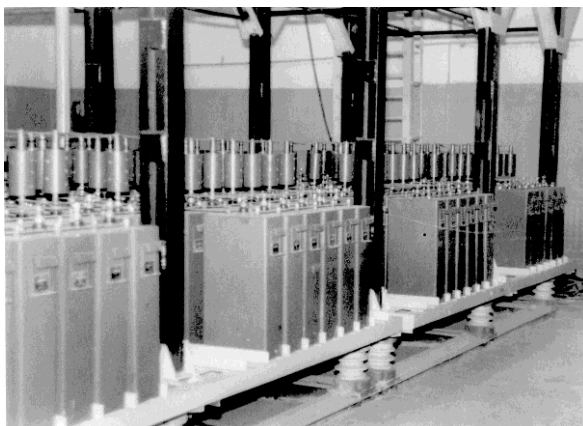


Рисунок П.6.4 – Общий вид батареи накопительных конденсаторов с блоком защитных резисторов в цилиндрическом корпусе



Рисунок П.6.5 – Общий вид батареи накопительных конденсаторов с защитными резисторами типа ТВО-60



Рисунок П.6.6 – Общий вид батареи накопительных конденсаторов  
с единичными защитными резисторами типа ТВО-60



## Содержание

Введение .....	3
1. Основные схемы защиты конденсаторов емкостных накопителей энергии на стадии заряда с использованием защитных резисторов .....	5
1.1. Схема защиты конденсаторов с резистором, включенным в цепь разряда ЕНЭ на нагрузку .....	5
1.2. Кольцевая схема защиты .....	9
1.3. Основные требования к защитным резисторам .....	11
2. Типы элементов, используемых в качестве защитных резисторов .....	12
3. Расчет параметров резисторов из проволоки с высоким омическим сопротивлением .....	20
3.1. Расчет активного сопротивления .....	20
3.2. Расчет индуктивности .....	21
3.3. Расчет теплового режима .....	24
3.4. Электрическая прочность .....	25
4. Блоки защитных резисторов на базе резисторов ТВО .....	26
5. Расчет параметров защитных резисторов .....	31
5.1. Общие требования .....	31
5.2. Расчет проволочных резисторов .....	31
5.3. Пример расчета проволочного резистора .....	32
5.4. Расчет блока резисторов ТВО .....	38
5.5. Пример расчета блока резисторов .....	40
Контрольные вопросы .....	42
Контрольные задания .....	43
Список литературы .....	45
Приложение 1. Краткий терминологический словарь .....	47
Приложение 2. Использование электронных таблиц Excel для расчетов защитных резисторов .....	48

Приложение 3. Характеристики проводниковых материалов с высоким омическим сопротивлением .....	53
Приложение 4. Основные характеристики резисторов типа ТВО ...	55
Приложение 5. Свойства изоляционных материалов .....	57
Приложение 6. Примеры выполнения резисторов .....	58

Навчальне видання

ПЕТКОВ Олександр Олександрович

**Розрахунок і проектування захисних резисторів  
ємнісних накопичувачів енергії**

Навчально-методичний посібник  
для студентів електротехнічних та електроенергетичних  
спеціальностей

Російською мовою

Відповідальний за випуск В. В. Рудаков

Роботу до видання рекомендував проф. С.М. Григоров

Редактор Л.А. Пустовойтова

План 2009 р., поз. 49/105-09

Підп. до друку 07.09.09. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офсетний.

Друк - ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк.  
2,0

Обл.-вид. арк. 2,75. Наклад 50 прим. Зам. № . Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ "ХП".

Свідectво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2000 р.

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

---

Друкарня НТУ "ХП".

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.



